

引用本文:付国,何斌,吴守军.性能参数对混凝土柱破坏指数的影响[J].建筑科学与工程学报,2022,39(3):146-153.

FU Guo, HE Bin, WU Shou-jun. Influence of Performance Parameters on Damage Index of Concrete Columns[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 146-153.

DOI:10.19815/j.jace.2021.11071

性能参数对混凝土柱破坏指数的影响

付国,何斌,吴守军

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

摘要:不同破坏准则对混凝土柱的破坏程度评价结果存在一定差异。针对已有抗震研究多考虑最终破坏指数与构件破坏程度的对应关系,未考虑不同破坏准则与构件性能参数选取对评估结果合理性的影响。以混凝土柱为研究对象,计算了极限状态下位移角与位移角限值比值、承载力与峰值承载力比值、变形与变形能力比值与双参数准则、延性准则破坏指数之间的相关系数,分析了破坏指数与破坏现象、破坏规律的吻合程度,探讨了几种性能参数对不同破坏准则的适用性。结果表明:极限状态下混凝土柱的变形能力值离散性最小,与位移角比值、承载能力退化值的相关性最低,更适合应用于破坏准则研究;双参数破坏准则计算结果受组合系数 β 的取值影响显著,反映的混凝土柱破坏趋势与承载力变化规律、试验现象存在较大差异;由延性破坏准则计算得出的破坏指数能反映位移角比值、承载力退化值、变形能力值对破坏的影响规律,考虑变形能力极限的延性准则能更好地量化混凝土柱的破坏。

关键词:抗震性能;混凝土柱;延性破坏准则;双参数破坏准则;变形能力

中图分类号: TU973.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2022)03-0146-08

Influence of Performance Parameters on Damage Index of Concrete Columns

FU Guo, HE Bin, WU Shou-jun

(College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University,
Yangling 712100, Shaanxi, China)

Abstract: The evaluation results of damage degree of concrete columns using different damage criteria are usually different. The existing seismic research mainly focuses on the corresponding relationship between the final failure index and the failure degree of members, whereas the influence of different failure criteria and the selection of member performance parameters on the rationality of the evaluation results is not considered. Taking the concrete column as the research object, the correlation coefficients between the ratio of displacement angle to the limit value of displacement angle, the ratio of bearing capacity to peak bearing capacity, and the ratio of deformation to deformation capacity and the failure index of double parameter criterion and ductility criterion were calculated. The coincidence degree of failure index with failure phenomenon and failure law was analyzed, and the applicability of several performance

收稿日期:2021-11-21

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ5113)

作者简介:付国(1984-),男,山西长治人,讲师,工学博士,E-mail:fuguo_47@126.com。

parameters to different failure criteria was discussed. The results show that the discreteness of deformation capacity value of concrete column in limit state is the smallest, and the correlation with displacement angle ratio and bearing capacity degradation value is the lowest, which is more suitable for the study of failure criterion. The value of combination coefficient β has a significant impact on the calculation results of double parameter failure criterion. There are great differences among the failure trend of concrete columns, the variation law of bearing capacity and test phenomena. The failure index calculated by the ductile failure criterion can reflect the influence law of displacement angle ratio, bearing capacity degradation value and deformation capacity value on failure. The ductility criterion considering the limit of deformation capacity can better quantify the failure of concrete columns.

Key words: seismic performance; concrete column; ductility failure criterion; double parameter failure criterion; deformation capacity

0 引言

强震作用下结构的抗震性能优劣关乎人民群众生命安全,依据破坏准则预测主要抗侧力构件特别是混凝土柱的性能退化程度一直是抗震研究的热点问题,对实现大震不倒设防目标具有重要意义^[1-5]。已有破坏准则通过探索构件破坏过程中变形、荷载、耗能等性能参数变化规律,研究极限状态下破坏指数与破坏现象的对应关系^[6-9]。

抗震规范^[6]和基于性能的抗震设计方法^[10]均通过比较位移角与预设构件极限值判断其破坏程度,位移角和变形参数虽然在测量、计算方面具有显著的优势,但对不同变形能力的构件采取同一判定指标是不合理的。滞回耗能不仅与构件变形能力相关,还受加载制度影响较大。试验表明不同加载幅值下构件破坏所需的总滞回耗能存在较大差异^[11],拟静力试验中加载循环次数对承载力、极限变形、总滞回耗能均具有显著影响^[12]。由于构件变形能力的差异,以变形、耗能为代表的单参数破坏准则不仅需要更多的试验验证以实现安全性与经济性的平衡,还应考虑加载制度、设计参数等因素的影响。

部分学者探索多参数组合的量化方法定义构件破坏,其中考虑首超破坏和累积耗能影响的 Park-Ang 双参数准则应用最为广泛^[13-14]。Park-Ang 准则中组合参数 β 和极限状态下的破坏指数也是后续研究和改进的重点^[15-17]。由于破坏过程中变形与耗能 2 个参数之间存在复杂耦合关系,如何解释和量化这种耦合关系是双参数准则合理、准确与否的关键。

基于疲劳理论提出了混凝土柱的等效延性破坏准则^[11],实现了单调加载与反复加载破坏准则表达

式的统一。深入的试验数据统计分析还发现延性系数的平方与总滞回耗能存在近似比例关系,考虑构件的极限变形能力大小与倒塌破坏之间的关系和轴压比、配箍率、承载力退化程度对混凝土柱破坏的影响,提出混凝土柱的改进延性破坏准则^[18]。综合破坏准则计算结果、性能参数变化规律与试验现象对应关系,讨论何种性能参数更适合应用于破坏准则研究,并对不同破坏准则的合理性进行分析以提升混凝土柱的抗震性能量化水平。

本文通过对比位移角与位移角限值的比值、承载力与峰值承载力的比值、反复加载下变形与单调加载下极限变形的比值同双参数准则、延性准则破坏指数之间的变化规律,分析性能参数、破坏指数与破坏现象的对应关系,研究性能参数选取对破坏指数计算结果的影响,探讨考虑变形能力极限的延性准则合理性。

1 性能参数与破坏准则

1.1 位移角比值

抗震规范完成了大量构件和框架模型试验的统计分析,建议混凝土框架层间位移角限值 $[\theta_p]$ 为 1/50,并留有一定安全储备^[6]。定义混凝土柱的位移角限值与层间位移角限值相同,位移角与位移角限值的比值 d_θ 由式(1)计算得出。

$$d_\theta = \frac{\theta}{[\theta_p]} \quad (1)$$

式中: θ 为反复加载下柱极限位移角。

考虑混凝土强度、配箍率、配筋率、轴压比、加载制度等设计参数的不同,不同延性混凝土柱位移角达到 1/50 时柱抗震性能存在较大差异^[7-8],破坏时的极限位移角也具有显著不同。

1.2 承载力退化值

混凝土柱承载力下降至无法满足上部结构需求时破坏不可避免,受场地限制和试验设备安全性要求,模型试验多选取承载力加速下降或达到某一特定值^[3,9](多为极限承载力的 85%)作为极限状态,参考位移角比值计算方法,承载力退化值 d_F 计算式为

$$d_F = \frac{F}{F_{\max}} \quad (2)$$

式中: F 为反复加载下柱破坏时的承载力; F_{\max} 为柱的峰值承载力;当构件承载力未达到峰值承载力时,混凝土柱未发生倒塌破坏, $d_F = 0$ 。

1.3 变形能力值

借鉴双参数准则^[13-14]研究成果,把单调加载下混凝土柱极限变形对应的延性系数定义为最大变形能力值 μ_{\max} , μ 为反复加载下位移幅值对应延性系数,变形能力值 d_μ 的计算式为

$$d_\mu = \frac{\mu}{\mu_{\max}} \quad (3)$$

变形能力值越大,柱的塑性变形发育越充分,越接近破坏极限状态,已有试验表明反复加载对应变形能力值 $d_\mu < 1.0$,单调加载时变形能力值 $d_\mu = 1$ 。

1.4 双参数破坏准则

双参数破坏准则计算式为

$$D = \frac{\delta_m}{\delta_\mu} + \beta \int \frac{d\epsilon}{Q_y \delta_\mu} \quad (4)$$

式中: D 为破坏指数; δ_m 为最大加载位移,由对应文献数据或滞回曲线拾取关键点位移得出; $\int d\epsilon$ 为累积滞回耗能,由滞回环面积计算得出; Q_y 为屈服荷载,根据文献数据得出; β 为组合系数; δ_μ 为单调加载下的极限变形。

考虑大多数试验中未设置单调加载条件下的对照试验,由式(5)计算得出 μ_{\max} ,即

$$\mu_{\max} = \frac{L_s \theta_{ust}}{\delta_y} \quad (5)$$

式中: L_s 为柱的计算长度; δ_y 为混凝土柱的屈服位移; θ_{ust} 为单调加载下矩形截面混凝土柱的极限转角。

θ_{ust} 由计算式(6)^[19]得出,即

$$\theta_{ust} = 0.15^n \alpha_{st,mon} \left(1 + \frac{\alpha_{sl}}{8}\right) \left[\max(0.01, \frac{\rho_y f'_y}{f'_c}) / \max(0.01, \frac{\rho_y f'_y}{f'_c}) \frac{L_s}{h} f'_c\right]^{0.425} \quad (6)$$

式中: $\alpha_{st,mon}$ 为与钢筋相关的系数(热轧钢取 1.25); α_{sl} 为钢筋的黏结滑移系数; n 为试件的实际轴压比;

h 为柱的截面高度; f_y 、 f'_y 为拉区和压区钢筋的抗压强度; ρ 、 ρ' 为拉区和压区纵向钢筋配筋率; f'_c 为混凝土的圆柱体抗压强度。

把单调加载视为位移幅值为 Δ_{\max} 、加载循环次数为 1/4 的反复加载,则 Δ_{\max} 为 1/4 次反复加载下混凝土柱的最大变形^[11]。从这个角度看 Park-Ang 准则变形项对变形能力强弱进行了思考:单调加载变形越大表明柱的变形能力越强,加载制度、位移幅值相同时变形能力强的构件破坏程度更小,继续抵御地震作用的能力越强,破坏指数也越小。

耗能项未能延续考虑变形能力影响的设计思想, Q_y 和 δ_μ 的组合能否定义为构件的最大耗能仍需更多研究,受加载制度、构件响应不确定性的影响,确定柱的最大耗能对双参数准则的改进和延续变形能力强弱的设计思想具有重要意义。

1.5 延性破坏准则

考虑相同设计参数、加载幅值情况下变形能力强的柱破坏更轻微,继续抵御地震动作用的能力也越强,变形能力强弱理应作为一个关键参数在破坏指数计算中予以考虑。参考双参数准则中变形项 δ_m/δ_μ 的表达式,结合拟静力试验结果,本文定义柱的最大变形为单调加载下的极限变形,即混凝土柱的最大变形能力值。

等效延性准则研究表明延性系数既定义了构件的变形大小,还可以定量描述构件的塑性变形发育程度,理论上更适宜作为破坏准则的分析参数;试验数据统计结果还表明延性系数平方与总耗能值存在近似比例关系,因此选择延性系数作为延性破坏准则的性能参数,考虑构件变形能力、轴压比和配箍率的影响建立了混凝土柱延性破坏准则^[18],计算公式为

$$D = k_n k_{\rho_v} \sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta_i} \left(\frac{\mu_i - 1}{\mu_{\max}}\right)^2 \quad (7)$$

$$k_n = 2^{2n} - 0.3 \quad (8)$$

$$k_{\rho_v} = 1.28e^{-0.1/\rho_v} \quad (9)$$

式中: β_i 为计算位移幅值下的加载循环次数; μ_i 为第 i 个加载幅值对应的延性系数; k_n 为轴压比影响系数; k_{ρ_v} 为配箍率影响系数; ρ_v 为配箍率。

延性准则不仅考虑了轴压比、配箍率、加载制度等对变形能力有显著影响的参数,还引入了单调加载延性系数,重点探索了变形能力大小对结构抗震性能的影响规律。与等效延性准则类似,延性准则同时适用反复加载与单调加载,实现了破坏准则计算公式的统一,探索了变形能力强弱与构件破坏变

形之间的影响规律。

2 混凝土柱试验数据

2.1 文献来源与模型编号

为研究破坏指数计算中设计参数的影响规律,选取 43 根弯曲线破坏为主的混凝土柱进行计算研究,各试件编号与文献来源见表 1。

表 1 混凝土柱编号

Table 1 Numbers of Concrete Columns

数据来源	试件编号
文献[20]	TP-1、TP-2、TP-3、TP-10、TP-11、TP-12、TP-13、TP-14、TP-15、TP-16、TP-17
文献[21]	c1、c4、c7、c8
文献[22]	Z2、Z3、Z4、Z5、Z7
文献[23]	C-F1、C-F2、C-F3、C-G1、C-G2、C-Q1、C-Q2
文献[24]	z2、z3、z4
文献[25]	YHC-1、YNC-1、YHC-2、YNC-2、YHC-3、YNC-3
文献[26]	KZc1、KZc2、KZc3
文献[27]	SC-1、SC-2
文献[28]	SC-5、SC-6

表 1 中柱的混凝土强度分布区间为 21.5~43.5 MPa,纵筋配筋率为 0.62%~4.29%,体积配箍率为 0.56%~1.71%,剪跨比为 3.0~4.0,轴压比为 0.04~0.50,具体参数见对应参考文献。

2.2 破坏指数计算结果

试验研究和理论分析多选取承载力下降至某一特定值作为柱的破坏临界点或试验加载终止点,承载力退化越严重的柱破坏程度和破坏速度也越大,为更好地研究破坏指数与承载力退化的相互关系,假定承载力退化最大值与破坏指数满足式(10)。

$$D_{\mu}=D_{0.85}\frac{0.85}{d_{\mu\max}}$$

(10)

式中: $d_{\mu\max}$ 为承载力退化最大值; D_{μ} 为混凝土柱倒塌极限状态对应的破坏指数; $D_{0.85}$ 为混凝土柱承载力退化至最大承载力 85%时对应的破坏指数。

混凝土柱的性能参数和破坏指数计算结果、承载力退化值 85%对应的破坏指数计算值见表 2。由表 2 可知,混凝土柱达到破坏极限时位移角比值的平均值为 1.951,标准差为 0.524,表明不同延性构件的破坏极限具有显著差异。承载力退化值为 0.614,远小于 85%试验建议值,选择 85%峰值承载力作为构件破坏临界状态同样具有一定的安全冗余度,标准差为 0.176,承载力退化值离散性显著低于位移角比值。

变形能力值的平均值为 0.712,标准差为

表 2 破坏指数计算结果

Table 2 Calculation Results of Damage Index

试件编号	位移角比值	承载力退化值	变形能力值	双参数准则破坏指数	双参数准则破坏指数*	延性准则破坏指数	延性准则破坏指数*
c1	1.69	0.528	0.768	1.167	0.725	1.009	0.627
c4	1.92	0.481	0.886	1.514	0.857	0.857	0.485
c7	2.48	0.555	0.988	1.687	1.102	2.102	1.372
c8	2.26	0.545	0.886	1.449	0.929	1.677	1.075
Z2	1.61	0.451	0.739	1.007	0.534	0.907	0.481
Z3	1.63	0.464	0.754	1.034	0.564	0.906	0.495
Z4	1.64	0.722	0.802	1.102	0.936	1.516	1.288
Z5	1.61	0.453	0.747	0.950	0.506	1.294	0.690
Z7	1.68	0.285	0.701	0.842	0.282	1.078	0.361
SC-1	2.36	0.635	0.761	1.248	0.932	0.997	0.731
SC-2	2.74	0.489	0.672	1.264	0.727	1.472	0.844
SC-5	2.05	0.804	0.660	1.075	1.017	1.016	0.951
SC-6	1.59	0.409	0.696	1.184	0.570	1.667	0.792
KZc1	1.20	0.618	0.864	1.272	0.925	1.464	1.064
KZc2	1.50	0.712	0.873	1.305	1.093	1.488	1.246
KZc3	1.60	0.838	0.788	1.437	1.417	1.348	1.329
YNC-1	1.64	0.406	0.682	1.131	0.540	1.756	0.839
YHC-1	1.28	0.493	0.532	0.852	0.494	0.681	0.395
YNC-2	1.63	0.569	0.697	1.254	0.839	1.282	0.858
YHC-2	1.60	0.641	0.663	0.988	0.745	0.871	0.657
YNC-3	1.55	0.558	0.643	1.342	0.881	1.457	0.956
YHC-3	1.56	0.598	0.645	1.246	0.877	1.359	0.956
z2	1.99	0.312	0.625	1.013	0.372	1.935	0.710
z3	1.49	0.626	0.647	0.883	0.650	0.888	0.654
z4	1.20	0.618	0.640	0.820	0.596	0.840	0.611
C-F1	2.14	0.878	0.779	1.318	1.361	0.785	0.811
C-F2	1.79	0.726	0.744	1.102	0.941	0.533	0.455
C-F3	1.56	0.820	0.740	1.174	1.133	0.593	0.572
C-G1	1.82	0.703	0.758	1.306	1.080	0.779	0.644
C-G2	1.63	0.768	0.706	1.041	0.941	0.444	0.401
C-Q1	1.75	0.770	0.726	1.357	1.229	0.885	0.802
C-Q2	2.07	0.646	0.861	1.399	1.063	1.100	0.836
TP-1	3.03	0.315	0.689	1.349	0.500	1.473	0.546
TP-2	3.22	0.271	0.629	1.125	0.359	1.110	0.354
TP-3	3.63	0.358	0.842	1.123	0.473	1.615	0.680
TP-10	1.97	0.660	0.532	1.298	1.008	0.700	0.544
TP-11	2.14	0.842	0.613	1.588	1.573	1.044	1.034
TP-12	2.13	0.873	0.603	1.374	1.411	1.005	1.032
TP-13	2.22	0.690	0.617	1.553	1.261	1.027	0.834
TP-14	2.21	0.763	0.579	1.511	1.356	0.928	0.833
TP-15	2.42	0.817	0.620	1.822	1.751	1.181	1.135
TP-16	2.63	0.898	0.686	2.713	2.866	1.584	1.673
TP-17	2.02	0.814	0.524	1.303	1.248	0.682	0.653
平均值	1.951	0.614	0.712	1.268	0.946	1.147	0.798
标准差	0.524	0.176	0.104	0.320	0.459	0.390	0.299

注:按文献[13]的 β 计算式得到的破坏指数显著偏大,根据文献[17]、[29]建议统一取 $\beta=0.05$ 计算了双参数准则的破坏指数;加“*”号组数据为承载力退化至 85%时的破坏指数。

0.104,表明混凝土柱破坏过程中变形能力值变化最小,选取单调加载极限变形为柱极限变形能力具有离散性低的显著优势。

双参数准则破坏指数平均值为 1.268,延性准则破坏指数平均值为 1.147,更接近 1.0,与试验现象更为吻合。承载力退化至 85%峰值承载力时破坏指数计算表明,双参数准则对应破坏指数的平均值为 0.946,延性准则对应破坏指数的平均值为 0.798。根据试验现象和破坏规律,混凝土柱承载力退化至 85%峰值承载力时未达到倒塌破坏极限状态,破坏指数也远小于 1.0,延性准则与试验现象吻合更好。

需要指出的是 Park-Ang 双参数准则中的计算式是基于 20 世纪 80 年代的混凝土柱数据统计得出的,受混凝土强度、钢筋用量、轴压比等参数的取值影响,得出的 β 值和破坏指数均显著偏大。

3 破坏指数与性能指标

3.1 性能参数间的相关系数

混凝土柱破坏越严重,位移角比值越大,承载力退化值就越小,极限位移越接近单调加载极限位移,对应的破坏指数与性能参数之间的相互关系应符合上述规律。为了研究不同性能参数与破坏指数之间的相关系数,借助 EXECL 软件中的 Correl 函数进行了研究,计算公式为

Correl(X,Y)_μ = $\frac{\sum (x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum (x-\bar{x})^2 \sum (y-\bar{y})^2}}$ (11)

式中: x 、 y 分别为 X 、 Y 两组参数的值; \bar{x} 、 \bar{y} 分别为 X 、 Y 两组参数的平均值;Correl(X , Y)_μ 为 X 、 Y 两组参数直接的相关系数,相关系数越接近 1 或 -1,表示两者之间越接近正相关或负相关,接近 0 表示两者之间为弱相关或不相关。

根据表 2 数据重点分析了位移角比值、承载力退化值和变形能力值 3 个参数与双参数破坏准则、延性准则之间的相关系数,计算结果见表 3。

表 3 破坏指数与性能参数的相关系数
Table 3 Correlation Coefficient of Damage Index and Performance Parameters

性能参数	位移角 比值	承载力退 化值	变形能 力值	双参数 准则	延性 准则
位移角比值	1.000	-0.168	0.044	0.402	0.280
承载力退化值		1.000	-0.102	0.449	-0.388
变形能力值			1.000	0.109	0.364

位移角比值和承载力退化值的相关系数为

-0.168,位移角比值与变形能力值的相关系数为 0.044,变形能力值与承载力退化值的相关系数为 -0.102,变形能力值与其余参数的相关性最低。

位移角比值、变形能力值与承载力退化值的相关系数为负,与柱破坏越充分承载力退化越严重,变形越大且越接近单调加载极限变形的规律相符。变形能力值与位移角比值的相关系数为正,表明随着变形的增加,变形能力值越大。两者相关系数仅为 0.044,说明柱的塑性变形发育程度与破坏之间的关系更为密切。

考虑不同构件破坏时极限值的显著差异,选取上述参数的某一阈值直接定义混凝土柱破坏很难兼顾安全性与经济性。

3.2 性能指标与破坏准则的相关系数

双参数准则破坏指数与位移角比值的相关系数为 0.402,与变形能力值的相关系数为 0.109,与承载力退化值的相关系数为 0.449。

反复加载下的极限承载力与峰值承载力的比值越小,柱破坏越严重,对应破坏指数应越大,两者之间应为负相关,双参数准则破坏指数与承载力退化规律及试验现象存在较大差异。试验研究和理论分析表明,柱变形是否接近其理论最大变形较变形大小对破坏的影响更为显著,双参数准则与变形能力值的相关系数较小,与破坏规律存在偏差。

延性准则破坏指数与位移角比值、承载力退化值、变形能力值的相关系数分别为 0.280、-0.388 和 0.364。计算结果表明延性准则与位移角比值的线性相关性低于变形能力值的相关性,与承载力退化值负相关,符合构件破坏规律,受承载力退化和变形能力对破坏影响显著,延性准则与破坏规律吻合更好。

综上所述,双参数准则不能合理反映柱破坏加剧与承载力退化值减少的规律,破坏指数与变形能力值的相关性较低。延性准则与 3 种性能指标的线性相关性更为合理,能够更好地解释不同构件的塑性变形发育程度、变形能力强弱对倒塌破坏的影响。

3.3 性能指标与破坏指数关系曲线

延性准则计算结果表明:承载力退化值变化规律为迅速增大至峰值承载力(退化值为 1.0),承载力逐渐开始下降,破坏指数增大;变形能力值对应破坏曲线的变化规律为单调递增,构件破坏过程中变形能力值不断增大,破坏指数递增。43 根混凝土柱的破坏曲线如图 1 所示。

由图1破坏曲线可知:混凝土柱的承载力退化

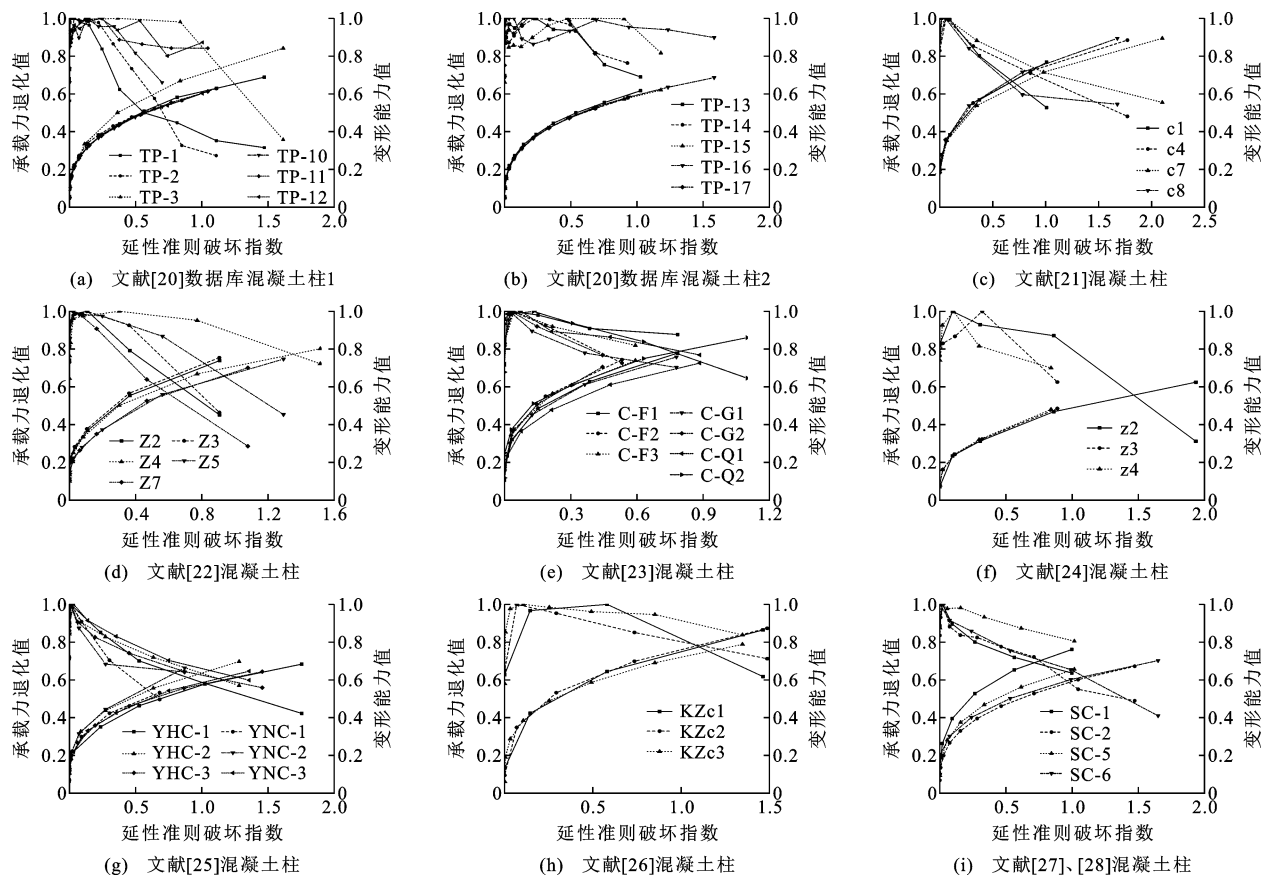


图1 混凝土柱破坏曲线
Fig.1 Failure Curves of Concrete Columns

值越小,变形能力值和破坏指数也就越大,破坏越充分,延性-变形能力值曲线斜率逐渐变小,承载力退化和破坏指数总体上呈加速状态;越接近破坏极限状态,柱的破坏速度越快,变形能力值越大,但变形能力的增速变缓,对应曲线斜率越小;承载力退化值在破坏过程中存在波动现象,对破坏指数计算存在不利影响,且柱破坏时承载力退化值的离散性较大。

变形能力值从供、需2个层面对构件性能退化程度进行量化,对应破坏曲线能更好地解释柱的破坏规律和破坏过程,变形能力值较变形(位移角)、承载力退化值更适宜作为倒塌破坏分析参数。

4 结语

(1)受设计参数和加载制度影响,混凝土柱破坏极限状态对应的位移角比值、承载力退化值和变形能力值存在较大差异,其中变形能力值与其余参数的线性相关性最小,平均值离散性也最低,理论上更适合作为混凝土柱的破坏准则性能参数。

(2)双参数破坏准则较好地反映了位移角比值、变形能力值与破坏指数之间的关系,但破坏指数与

承载力退化关系与试验规律不相符,破坏指数计算值受组合参数 β 影响较大。

(3)基于能量的延性破坏准则能够较好地实现柱的破坏量化研究,与试验现象、破坏规律吻合度更好,由于定义了柱最大变形能力,能够适用不同延性构件倒塌破坏的量化研究。

参考文献:

References:

- [1] DENIZ D, SONG J, HAJJAR J F. Energy-based Seismic Collapse Criterion for Ductile Planar Structural Frames[J]. Engineering Structures, 2017, 141: 1-13.
- [2] 何庆锋, 聂玉莲, 邓颖婷. 地震作用下损伤RC框架抗竖向倒塌分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(6): 64-72.
- HE Qing-feng, NIE Yu-lian, DENG Ying-ting. Analysis of Vertical Collapse Resistance of Damaged RC Frame Structure Under Seismic Action[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(6): 64-72.
- [3] 曹晓波, 王文炜, 宋元印, 等. 地震作用下钢筋混凝土墩柱损伤指数计算方法[J]. 建筑科学与工程学报,

- 2019,36(1):85-92.
- CAO Xiao-bo, WANG Wen-wei, SONG Yuan-yin, et al. Calculated Method of Damage Index for Reinforced Concrete Pier Under Earthquake Action[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(1):85-92.
- [4] 付 国,刘伯权,邢国华. 基于有效耗能的改进 Park-Ang 双参数损伤模型及其计算研究[J]. 工程力学, 2013,30(7):84-90.
- FU Guo, LIU Bo-quan, XING Guo-hua. The Research and Calculation on Modified Park-Ang Double Parameter Seismic Damage Model Based on Energy Dissipation[J]. Engineering Mechanics, 2013,30(7):84-90.
- [5] 苏信智,刘伯权,马煜东,等. 设计参数对 RC 框架结构抗倒塌性能的影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2019,39(3):84-98.
- SU Ji-zhi, LIU Bo-quan, MA Yu-dong, et al. Influence of Design Parameters on Seismic Collapse Resistant Performance of RC Frame Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019,39(3):84-98.
- [6] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- Code for Seismic Design of Buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [7] 刘 科,黄 娇,马煜东,等. 钢筋混凝土柱的破坏形态及变形能力研究[J]. 震灾防御技术, 2019,14(4):750-759.
- LIU Ke, HUANG Jiao, MA Yu-dong, et al. Study on Failure Mode and Deformation Capacity of Reinforced Concrete Columns [J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2019,14(4):750-759.
- [8] 陆本燕,刘伯权,刘 鸣,等. 钢筋混凝土桥墩性能指标量化研究[J]. 中国公路学报, 2010,23(6):49-57.
- LU Ben-yan, LIU Bo-quan, LIU Ming, et al. Quantitative Research on Reinforced Concrete Performance Index of Reinforced Concrete Bridge Column[J]. China Journal of Highway and Transport, 2010,23(6):49-57.
- [9] 蒋丽忠,邵光强,王 辉,等. 高速铁路圆端形空心桥墩抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2014,31(3):72-82.
- JIANG Li-zhong, SHAO Guang-qiang, WANG Hui, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Hollow Piers with Rounded Rectangular Cross Section in High-speed Railways[J]. Engineering Mechanics, 2014,31(3):72-82.
- [10] Structural Engineers Association of California. A Framework for Performance-based Engineering, SEAOC Vision 2000[R]. Sacramento: Structural Engineering Association of California, 1995.
- [11] 刘伯权. 抗震结构的破坏准则及可靠性分析[M]. 北京:中国建材工业出版社, 1995.
- LIU Bo-quan. Criteria for Seismic Structural Damage and Reliability Analysis[M]. Beijing: China Building Material Press, 1995.
- [12] 张 勤,李 振,顾祥林,等. 考虑循环次数影响的弯剪破坏 RC 柱荷载-变形关系及抗震性能分析[J/OL]. 建筑结构学报: 1-12 [2022-01-07]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2021.0341>.
- ZHANG Qin, LI Zhen, GU Xiang-lin, et al. Load-deformation Relationship and Seismic Performance Analysis of Flexural-shear Failure RC Columns Considering the Influences of Cycle Number[J/OL]. Journal of Building Structures: 1-12 [2022-01-07]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2021.0341>.
- [13] PARK Y J, ANG A H S. Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1985,111(4):722-739.
- [14] PARK Y J, ANG A H S, WEN Y K, et al. Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings [J]. Journal of Structural Engineering, 1985,111(4):740-757.
- [15] 牛荻涛,任利杰. 改进的钢筋混凝土结构双参数地震破坏模型[J]. 地震工程与工程振动, 1996,16(4):44-54.
- NIU Di-tao, REN Li-jie. A Modified Seismic Damage Model with Double Variables for Reinforced Concrete Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1996,16(4):44-54.
- [16] KALATEH-AHANI M, AMIRI S. A Park-Ang Damage Index-based Framework for Post-mainshock Structural Safety Assessment[J]. Structures, 2021, 33(12):820-829.
- [17] HUANG H, GUO M X, ZHANG W, et al. Numerical Investigation on the Bearing Capacity of RC Columns Strengthened by HPFL-BSP Under Combined Loadings[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 39: 102266.
- [18] 付 国,何 斌,刘伯权. 钢筋混凝土框架柱延性破坏准则研究[J]. 工程力学, 2021,38(11):122-133.
- FU Guo, HE Bin, LIU Bo-quan. Research on Ductility Failure Criterion of Reinforced Concrete Frame Columns[J]. Engineering Mechanics, 2021,38(11):122-133.

- [19] PANAGIOTAKOS T B, FARDIS M N. Deformations of Reinforced Concrete Members at Yielding and Ultimate[J]. ACI Materials Journal, 2001, 98(2): 135-148.
- [20] Kawashima Laboratory Department of Civil Engineering. Cyclic Loading Test Data of Reinforced Concrete Bridge Piers[EB/OL]. [2021-10-21]. <http://seismic.cv.titech.ac.jp/en/titdata/titdata.Html>.
- [21] 邓艳青. HRB500 钢筋混凝土柱的抗震性能试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
DENG Yan-qing. Experimental Studies on Seismic Behavior of HRB500 RC Columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [22] 胡伟强. 高强箍筋混凝土柱抗震抗剪性能试验研究[D]. 重庆:重庆大学, 2018.
HU Wei-qiang. Experimental Study on Seismic Shear Performance of High-strength Reinforced Concrete Columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.
- [23] 李艳艳, 苗少峥, 张亚龙. HRB600E 钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(15): 58-62, 68.
LI Yan-yan, MIAO Shao-zheng, ZHANG Ya-long. Experimental Research on Seismic Performance of Concrete Columns Reinforced with HRB600E Steel Bars[J]. Building Structure, 2020, 50(15): 58-62, 68.
- [24] 龙业平. 钢筋混凝土柱快速加载试验及动力滞回规律研究[D]. 长沙:湖南大学, 2010.
LONG Ye-ping. Experimental Study on Dynamic Hysteretic Rule of Reinforced Concrete Columns Under Rapid Loading[D]. Changsha: Hunan University, 2010.
- [25] 史庆轩, 王朋, 田园, 等. 高强箍筋高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 161-167.
SHI Qing-xuan, WANG Peng, TIAN Yuan, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of High-strength Concrete Columns with High-strength Stirrups[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(8): 161-167.
- [26] 涂小文. 钢筋混凝土框架柱构件抗震性能试验研究及有限元分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2009.
TU Xiao-wen. Experimental Study and Nonlinear Numerical Simulation on Seismic Performance Considering Columns of Reinforced Concrete Frame [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [27] 李杨. 钢筋混凝土柱非线性变形分解试验及模拟[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
LI Yang. A Simulation and Test of Nonlinear Deformation Decomposition in Reinforced Concrete Columns [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [28] 张和平. 钢筋混凝土柱抗震性能试验及优化模拟分析[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
ZHANG He-ping. Experiment and Optimized Modeling on Seismic Performance of RC Column [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [29] 傅剑平, 王敏, 白绍良. 对于钢筋混凝土结构的 Park-Ang 双参数破坏准则的识别和修正[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 73-79.
FU Jian-ping, WANG Min, BAI Shao-liang. Identification and Modification of the Park-Ang Criterion for Failure of RC Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2005, 25(5): 73-79.